

УДК 622.8+550.4:574.4

ПРОГНОЗ НЕФТЕГАЗООПАСНЫХ ЗОН НА РУДНИКЕ «УДАЧНЫЙ» (ЯКУТИЯ) С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕОСИСТЕМНОГО ПОДХОДА

© А.В. Дроздов¹, А.И. Мельников²

^{1,2}Институт земной коры СО РАН, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128.

Строительство подземного рудника вскрыло ряд негативных особенностей месторождения, при этом наибольшие проблемы проявились при вскрытии водо- и нефтегазонасыщенных зон. Во всех подземных сооружениях начались возгорания нефтепроявлений, повторные взрывы газозвдушной смеси при шпуровой отпалке горной массы, некоторые аварии и инциденты, приведшие к вынужденным простоям и дополнительным материальным затратам. Систематизированы имеющиеся к настоящему времени материалы по газоносности месторождения трубки «Удачная» и газопроявлениям при освоении его глубоких горизонтов. Газовая составляющая на месторождении представляет собой сложные смеси газов воздушного, химического, метаморфического, магматического и радиогенного происхождения с тремя основными типами разновидностей нахождения: свободной, сорбированной и растворенной. Установлено, что влияние газовых факторов на подземную отработку месторождения с сопутствующими газодинамическими явлениями зависит в первую очередь от интенсивности проветривания тупиковых забоев, степени их обводненности, литолого-стратиграфической и структурно-тектонической обстановки на участках строительства и эксплуатации, наличия нефтегазонасыщенных отложений и флюидоупорных экранов, а также основных типов нахождения газовой составляющей в разрабатываемых породных и рудных массивах. Одной из особенностей при освоении месторождения трубки «Удачная» является повышенная встречаемость сосредоточенных газовыделений в разломных зонах, иногда с увеличенным содержанием водорода в начальный период их вскрытия. Предложена качественная и количественная оценка показателей нефтегазоопасности участков (зон), позволяющая осуществлять детальное районирование месторождения и выделять наиболее значимые объекты при прогнозе степени сложности ведения горнопроходческих и добычных работ на подземном руднике.

Ключевые слова: нефтегазоопасные зоны; рудник «Удачный»; кимберлитовая трубка; рудное тело; Далдыно-Алакитский район; разрывное нарушение.

FORECAST OF OIL AND GAS HAZARDOUS ZONES IN THE "UDACHNAYA" (YAKUTIA) OPEN-PIT MINE USING A GEOSYSTEM APPROACH

A.V. Drozdov, A.I. Melnikov

Institute of the Earth Crust SB RAS, 128 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia.

Construction of underground mine has revealed a number of negative features of the deposit, whereas the greatest problems became apparent at the opening of water- and oil and gas saturated zones. All underground constructions experienced ignitions of oil shows, repeated explosions of air-gas mixes at rock mass blast shooting, some failures and incidents, which have led to forced idle hours and additional material inputs. The materials available by this time on the gas bearing capacity of "Udachnaya" pipe and gas shows under the development of its deep horizons have been systematized. A gas component on a deposit is composed of complex mixes of gases of air, chemical, metamorphic, magmatic and radiogene origin occurred in three basic types: free, retained and dissolved. It is determined that the effect of gas factors on underground mining of the deposit with accompanying gas dynamic phenomena depends, first of all, on airing intensity of dead ends, their watering degree, lithologically-stratigraphical and structurally-tectonic conditions at construction and operation sites, presence of oil and gas saturated depositions and fluid-resistant screens, as well as basic occurrence types of the gas component in developed rock and ore massifs. One of the features of pipe "Udachnaya" development is considerable occurrence of concentrated gas emissions in fault zones, sometimes with the increased content of hydrogen at the initial stage of their

¹Дроздов Александр Викторович, профессор РАЕ, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник лаборатории геологии древних платформ, тел.: 89149243730, e-mail: drozdovav@list.ru.

Drozdov Alexander, Professor RAE, Candidate of Geological and Mineralogical sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Geology of Ancient Platforms, tel.: 899149243730, e-mail: drozdovav@list.ru

²Мельников Александр Иванович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геологии древних платформ, тел.: 89027680079, e-mail: mel@crust.irk.ru

Melnikov Alexander, Doctor of Geological and Mineralogical sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Geology of Ancient Platforms, tel.: 89027680079, e-mail: mel@crust.irk.ru

opening. We propose a qualitative and quantitative evaluation of the indicators of zone (site) oil and gas hazard that allows to carry out a detailed zoning of the deposit and distinguish the most significant objects when forecasting the complexity of shaft-sinking and tunneling works on an underground mine.

Keywords: oil and gas hazardous zones; "Udachny" open-pit; kimberlite pipe; ore body; Daldyno-Alakitsky district; fracture.

Крупнейшее месторождение алмазов России – трубка «Удачная» – расположено в Далдыно-Алакитском районе, входящем в состав северной геокриологической зоны Сибирской платформы, которой свойственно сплошное распространение многолетнемерзлых пород, непрерывность криогенной толщи, значительная ее мощность (до 1500 м) и высокие значения отрицательных температур (до -16°C) [1]. Начавшееся строительство подземного рудника вскрыло ряд негативных особенностей месторождения, при этом наибольшие проблемы проявились при вскрытии водо- и нефтегазонасыщенных зон. Во всех подземных сооружениях (три вертикальных ствола глубиной около 1000 м, наклонные и горизонтальные выработки) начались возгорания нефтепроявлений, повторные взрывы газоздушных смесей при шпуровой отпалке горной массы, некоторые аварии и инциденты, приведшие к вынужденным простоям и дополнительным материальным затратам.

Существующие сложности при строительстве других подземных алмазодобывающих рудников в Якутии не являются на сегодняшний период настолько актуальными, как на трубке «Удачная». Поэтому не все позиции ранее разработанных технологий проходки, специальных мероприятий борьбы с этими явлениями, а также способов прогноза и оценки газообильности подземных выработок оказались действительны в реальных условиях вскрытия глубоких горизонтов. Аналогичная ситуация возникнет при добычных работах по рудным телам, так как изменчивость многих геологических факторов на стадиях разведок не была детально изучена. В связи с вышеотмеченным исследование геомеханических, нефтегазовых, гидродинамических и других условий месторождения, а также обеспечение и

контроль безопасных условий производства горнопроходческих и добычных работ приобретают существенную актуальность и практическую значимость.

Региональную и локальную сеть дизъюнктивных дислокаций в кимберлитовом поле образуют системы глубоко проникающих разломов фундамента, а также мелких разрывов и зон повышенной и интенсивной трещиноватости, связанных с формированием самих кимберлитовых тел и интрузий долеритов [3]. Формирование этих систем, наиболее вероятно, связано с региональным полем напряжений, сбросовыми и сдвиговыми подвижками в фундаменте Сибирской платформы.

Кимберлитовая трубка «Удачная», состоит из двух сопряженных тел (западного и восточного) (рис. 1). В верхней части разреза осадочного чехла оба тела соприкасаются друг с другом, однако начиная с глубины 250–270 м они разобщены в земном пространстве. В рудной структуре месторождения установлено 8 кимберлитовых жил и 3 небольших сателлитных тела (до 5–10 м), структурно увязанных в две системы направлений с азимутами 63–65 и 85°. Сложность горно-геологических условий месторождения обусловлена распространенными во вскрываемом разрезе газонасыщенными хлоридными кальциевыми рассолами; неравномерной газо- и нефтенасыщенностью осадочных пород и кимберлитов; изменчивой геотермической обстановкой; совместным осуществлением открытых горных работ со строительством и проходкой подземных горных выработок рудника «Удачный».

В целом формирование кимберлитовых трубок отражено в локальных деформациях осадочного чехла в виде мелких хаотично ориентированных хрупких разрывов, зон брекчирования, катаклаза и образования мелких приразломных

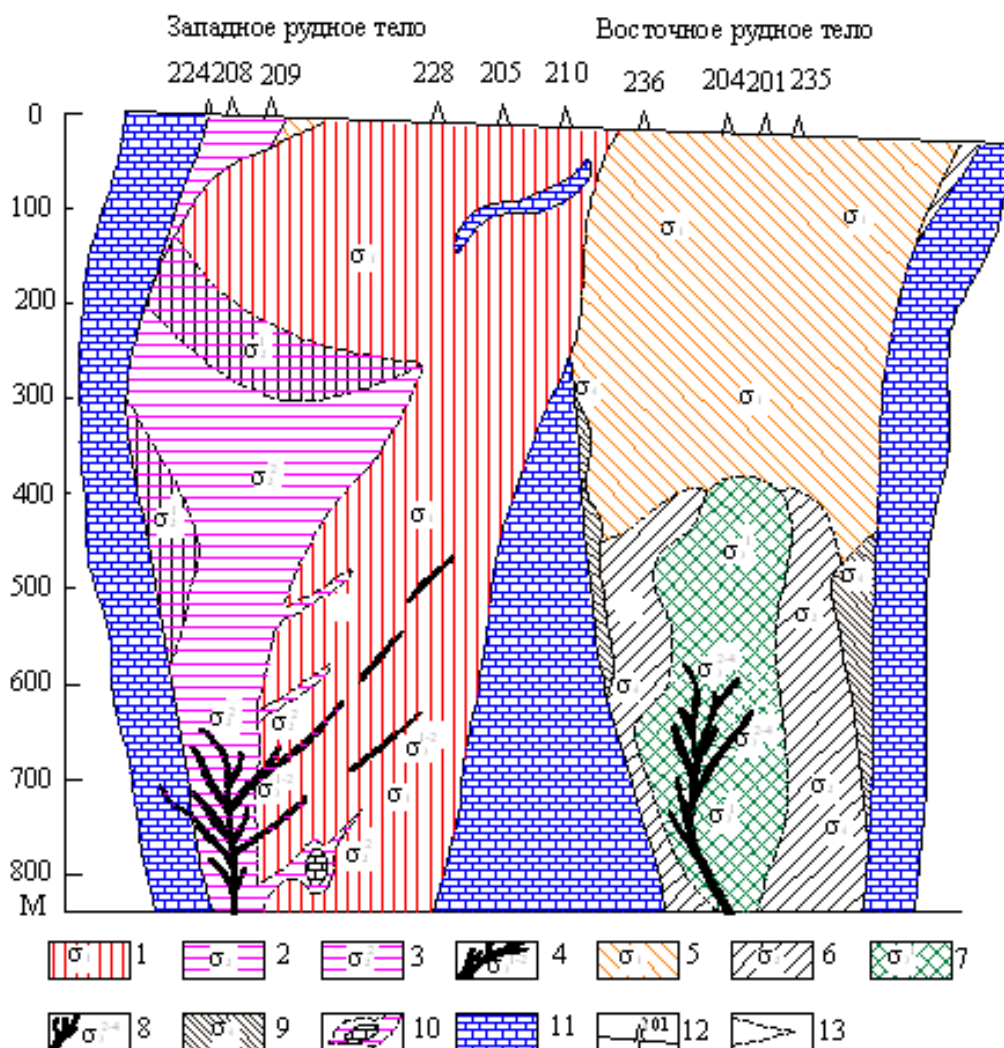


Рис. 1. Схематический геологический разрез трубки «Удачная»:

1–4 – западное рудное тело: 1–3 – кимберлитовая брекчия (1 – первого этапа, 2 – второго этапа с первичными текстурами течения, 3 – второго этапа с массивной текстурой связующей массы), 4 – жильные кимберлиты заключительного этапа; 5–9 – восточное тело: 5–7 – кимберлитовая брекчия (5 – первого этапа с массивной текстурой связующей массы, 6 – автолитовая второго этапа, 7 – третьего этапа); 8 – жильные кимберлиты; 9 – кимберлит четвертого этапа; 10 – крупные ксенолиты осадочных пород; 11 – вмещающие породы карбонатного состава; 12 – разведочные скважины; 13 – контакты между кимберлитовыми породами различных этапов

складок изгиба. Анализ тектонической обстановки на месторождении показывает, что оба тела трубки «Удачная» расположены в четком разломном узле, образованном пересекающимися диагональными системами региональных разрывных нарушений (северо-восточной и несколькими северо-западными), осложненными мелкими околотрубочными локальными разрывами (рис. 2). При этом северо-восточная система, вероятно, является более мощной и ранней. Она обычно контролирует местоположение мелких кимберлитовых тел и жил в

районе основной трубки. Судя по ориентировке штрихов скольжения на плоскостях крупных трещин и по скульптурам роста самих трещин по кинематическому типу эту систему можно отнести к левому сдвигу. Северо-западные разрывные нарушения выражены преимущественно зонами повышенной или интенсивной трещиноватости и катаклаза пород, особенно в верхних частях осадочного чехла. Они более молодые и контролируют большинство долеритовых интрузий в регионе.

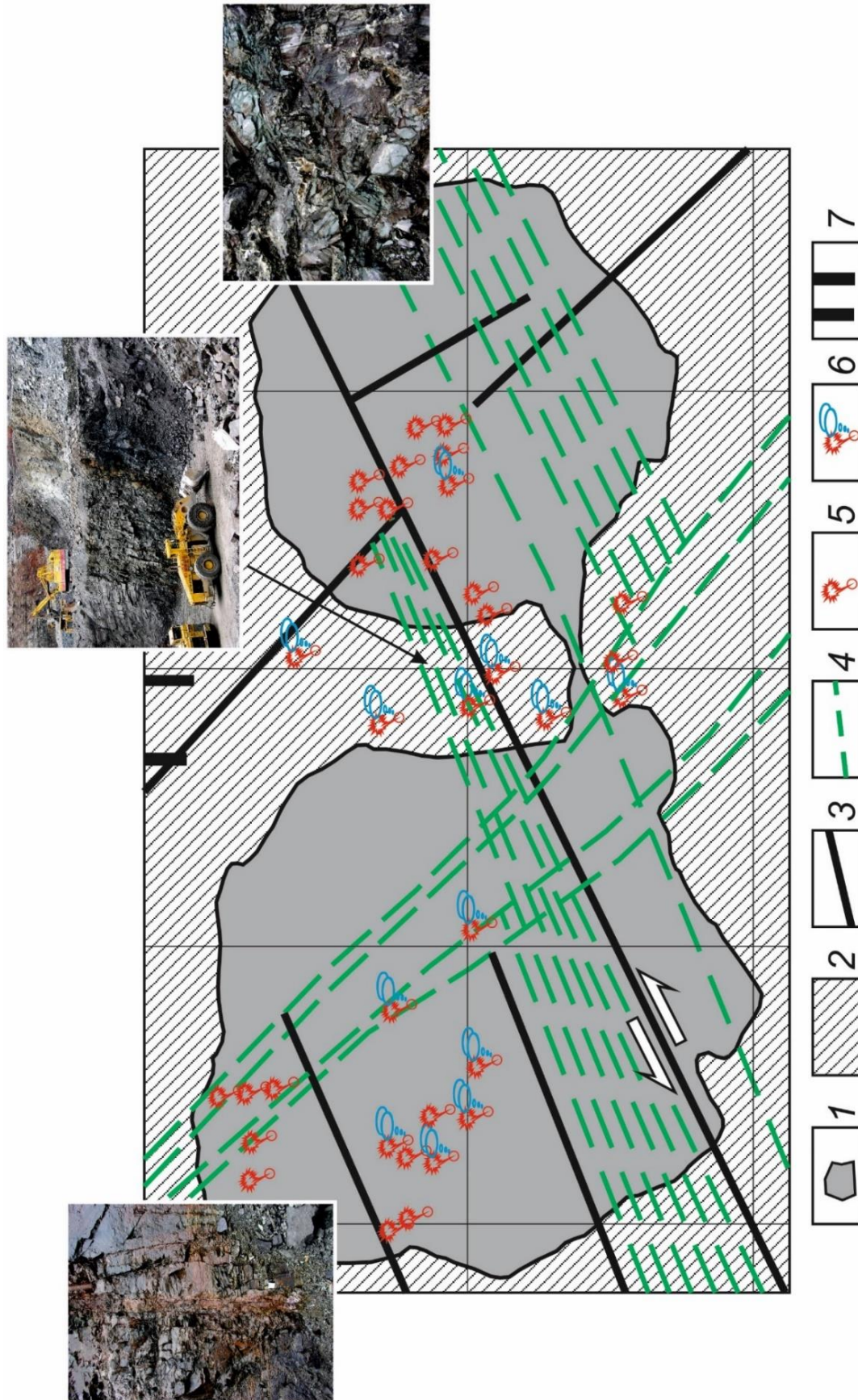


Рис. 2. Разломные системы с газо- и водопроявлениями в скважинах на нижнем горизонте карьера трубки «Удачная»:
 1 – рудное тело; 2 – палеозойские осадочные породы; 3 – основные разрывные нарушения; 4 – зоны дробления, катаклаза и повышенной трещиноватости; 5 – скважины с газо- и водопроявлениями; 6 – скважины с газо- и водопроявлениями; 7 – штольни подземного рудника

Общие представления о геологическом строении, структуре и генезисе кимберлитовых тел, данные о фильтрационных показателях вмещающих пород и кимберлитов разных алмазных месторождений Якутии говорят о том, что «трубки взрыва» и нарушенные разрывными дислокациями прилегающие блоки осадочного чехла могут являться своеобразными «гидравлическими окнами» в подземной гидросфере, по которым мигрируют подземные флюиды из глубоких горизонтов и прилегающих областей. К примеру, при вскрытии кимберлитоконтролирующей тектонической зоны в межтрубном пространстве трубки «Удачная» на горизонте -380 абс. м во время проходки восточного вентиляционного комплекса (ВВК) фиксируемые водопритоки достигали $80 \text{ м}^3/\text{ч}$, что свидетельствует о прямой связи между распространенным ниже водообильным среднекембрийским водоносным комплексом и горной выработкой. Через зону тектонических нарушений газонасыщенные рассолы мигрировали в обрабатываемое пространство рудника из сопряженных областей, обладающих высокими фильтрационно-емкостными показателями. В течение двух месяцев в забое ВВК газовая обстановка оставалась сложной со значительным превышением предельно допустимых концентраций по взрывоопасным газам, при этом дальнейшая проходка выработки была приостановлена. Поэтому требуется обязательный учет этого важного структурно-тектонического фактора для краткосрочного и долгосрочного прогнозов при отработке глубоких горизонтов месторождения с оценкой газо- и водопритоков в подземные горные выработки.

Коренные алмазоносные месторождения характеризуются большим диапазоном состава, свойств, форм содержания и неравномерностью распределения природных газов в породных толщах и кимберлитах. Газовая составляющая на месторождении представляет собой сложные смеси газов воздушного, химического, метаморфического, магматиче-

ского и радиогенного происхождения с тремя основными типами разновидностей нахождения: свободной, сорбированной и растворенной. Отмечена в определенных интервалах криогенных толщ района и гидратная форма существования газовых скоплений [1, 2]. По составу основных компонентов природные газы подразделяются на азотные и углеводородные с их вариациями. Как известно, многокомпонентные газовые смеси, одни и те же газы могут образовываться в результате различных геохимических процессов с преобладанием того или иного из них в зависимости от конкретной геолого-геохимической обстановки региона. Характерными отличиями природных газов алмазоносных месторождений являются относительно высокие содержания водорода и тяжелых углеводородов от этана (C_2H_6) до гексана (C_6H_{14}) [1, 6 и др.]. Распределение газов во вмещающих осадочных породах и в кимберлитовых трубках носит сложный характер. Состав, масштабы и интенсивность газопроявлений зависят в первую очередь от вещественного состава пород, структурно-тектонической обстановки вблизи месторождения, в той или иной его части, а также от других геологических показателей.

В рудных телах спонтанные выделения горючих газов приурочены в основном к зонам вскрытия эндогенной трещиноватости или к контактам разных типов кимберлитов (фаз внедрения магматического вещества) и локальным газовым ловушкам. Помимо рассмотренных общих закономерностей величина газонасыщенности отдельных проницаемых участков, прилегающих к рудным телам, тесно связана с их тектонической нарушенностью, т.е. имеется возможность миграции флюидов и в настоящее время из глубинных интервалов подземного прилегающего пространства и выходом газа по трещинным зонам в центре депрессии (внутри рудного поля). Изучение изотопного состава углерода метана дает возможность проследить закономерности его изменения и сделать

выводы об условиях его генерации. Изотопный состав углерода метана ($\delta^{13}\text{C}$) в кимберлитовых трубках и вмещающих карбонатных породах варьирует от -48,2 до -20,7% [8]. Как показали многочисленные исследования, контрастность кинетического изотопного эффекта и его зависимость от температуры значительно смазаны, и прослеживается лишь общая тенденция в утяжелении изотопного состава углерода метана с глубиной. Анализ полученных данных изотопных исследований показывает, что среди всех исследованных газов алмазоносной провинции [6, 7 и др.] выделяются две группы. Первая – группа термокаталитической генерации углеводородов – соответствует интервалу значений $\delta^{13}\text{C}$ от -48,2 до -35,2%. Газы второй группы отличаются более высоким содержанием тяжелого изотопа углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в метане от -33,9 до -20,7%. При этом объем проб второй группы составляет 66,7% всего объема опробований на изотопию. Очевидно, что метан второй группы образовался на глубинах более 10 км, отвечающих интервалам высоких температур, т.е. области глубокого синтеза метана.

Источником CH_4 первой группы является зона каталитической генерации углеводородов (глубины 2,5–3,0 км), в которой изотопный состав газа отражает суммарный эффект каталитической зоны и глубинного синтеза. В этой же зоне происходит образование и тяжелых углеводородов, $\delta^{13}\text{C}$ которых составляет $-40,0 \pm 0,2\%$. Следует подчеркнуть, что, чем выше изотопный показатель углерода, тем больше интенсивность вертикальной миграции углеводородов (в первую очередь метана) для региона. Это еще одно убедительное доказательство того, что кимберлитовые трубки являются своеобразным гидрогеологическим «окном» для гидравлической связи между различными обводненными интервалами пород осадочного чехла.

Изучение природной газонасыщенности алмазоносных трубок Якутии показало, что в составе компонентов газовой смеси всех форм нахождения присутствует

постоянно незначительное количество водорода. В кимберлитах выделяется две его генерации – эпигенетическая и сингенетическая. Образование водорода на больших глубинах или в магматических очагах обусловлено различными реакциями, в которых наибольшее значение отводится воде, выступающей в роли донора. При окислении закисного железа, углерода, окиси углерода или углеводородов происходит восстановление водорода. Образование свободного и растворенного водорода также связывается с воздействием магматического расплава на органическое вещество осадочных толщ чехла, электрохимическими реакциями или бактериальным брожением нефти.

Внутри и вблизи рудных тел разные формы нахождения водорода сопряжены со значительными изменениями кимберлита в процессе карбонатизации и серпентинизации. Данное генетическое представление об этом компоненте вполне увязывается с временной этапностью внедрения кимберлитовых расплавов, в частности по трубке «Удачная-Восточная» (см. рис. 1). Здесь ураганные содержания водорода были приурочены к последней фазе внедрения кимберлитов, которой свойственны несерпентинизированные разности пород с натровыми карбонатами поздней гидротермально-метасоматической стадии становления [4, 9]. Сорбированные и свободные газовые скопления в замкнутых коллекторах этой части рудного тела с неизменным оливином можно рассматривать как сингенетические, т.е. образованные совместно с длительным этапом формирования трубок в процессе многофазного внедрения кимберлитового расплава на месторождении. Изотопный состав углерода метана спонтанного выделения из этой части трубки колебался от -2,04 до -2,44%, что свидетельствует об его эндогенной природе и «консервации» летучих компонентов в кимберлите. При рассмотрении состава газа в серпентинизированных кимберлитах можно отметить совершенно иную картину. В породах трубки «Удачная-Западная» до

глубины 750 м содержание водорода не превышает 0,15% и только ниже повышается в отдельных пробах до 0,86%. Эти данные указывают на интенсивный массоперенос, преобразование минерального вещества кимберлитов с выносом углеводородов в верхние части разреза и дегазацию горного массива.

Каждая форма скопления (нахождения) горючих газовых смесей создает определенные сложности и влияет на безопасность производства подземных работ. На общем состоянии воздушной атмосферы строящегося рудника по большей части сказывается интенсивность притока подземных вод в горные выработки с поступающими совместно растворенными газами. Выделяющиеся из рассолов горючие газы создают основной фон газонасыщенности в забоях, буровых нишах, тупиковых выработках и вблизи зумпфов, насосных и др. Газы, выделяющиеся из подземных вод месторождения, по своему составу отнесены к I категории взрывоопасных смесей [10].

Свободные газовые проявления струйного и суфлярного типов в подземных выработках рудника, приуроченные к трещинным зонам, относятся к газодинамическим явлениям и считаются наиболее опасными. Они встречались и отмечаются при шпуровом обурировании забоев в вертикальных стволах (ВВС, СС, КС), наклонных съездах, квершлагах и других горных выработках. В то же время характер газопроявлений данного типа имеет спорадическое распространение на месторождении с ярко выраженной нисходящей интенсивностью от нескольких сотен л/мин до нулевых значений. Данный тип газодинамических явлений связан в основном со вскрытием трещинных проницаемых зон, приуроченных к дизъюнктивным дислокациям регионального плана. Подземный рудник «Удачный» обоснованно отнесен к рассоло- и нефтегазоопасным объектам, где безопасность по нефтегазовым показателям регламентируется «Специальными мероприятиями...», 2013 [10].

Трещинно-жильные воды крутопадающих разрывных дислокаций имеют относительно узлокальный характер распространения в горных массивах. Запасы подземных вод в трещинных полостях имеют несравнимо меньшие показатели, чем у порово-пластовых коллекторов осадочных отложений. Однако крупные тектонические нарушения никогда не представляют собой единую трещину. Они выражены, как правило, разрывной зоной, ширина которой варьирует от первых сотен метров до нескольких километров. Эта закономерность в карьере трубки «Удачная» наблюдается в его юго-западном и северо-восточном бортах. Зона кимберлитоконтролирующего разлома состоит из большого числа трещин, параллельных друг другу. В связи с неоднородностью состава и свойств пород разреза осадочного чехла ширина разрывной зоны, интенсивность тектонической трещиноватости и расстояние между самими трещинами постоянно изменяются внутри разломной системы.

По характеру выделения газов на месторождении наблюдаются практически все виды газопроявлений: от газоотдачи жидкостей (нефти, вод), пород, газовых струй до внезапных выбросов, как правило, вместе с рассолами. Интенсивность водогазопроявлений на месторождении варьирует в широких пределах и достигает 200 м³/ч. Наиболее интенсивные выделения газа происходили при вскрытии разрывных нарушений. Имеющиеся в настоящее время данные убедительно свидетельствуют о пространственной приуроченности всех сосредоточенных газопроявлений и значительной части нефтебитумопроявлений в телах трубки к ослабленным трещиноватым зонам и кавернозным пустотам. В пределах Западного рудного тела некоторые газопроявления были приурочены к структурно-тектоническим полостям, заполненным водно-газовой смесью под давлением. Размеры полостей изменяются от 1 до 5–10 м. Вскрытие таких полостей сопровождается выбросами газированных рассолов.

Основной и наиболее распространенной формой газовыделений при освоении месторождения трубки «Удачная» является газоотдача подземных вод. При этом газообильность выработок определяется притоком рассолов, их газонасыщенностью и газоотдачей. Не следует ожидать значительных по интенсивности выделений газов из нефтеносных пород вследствие их ограниченной распространенности и относительно низкой газонасыщенности. Интенсивность и состав сосредоточенных газовыделений из «ловушек» не поддается в настоящее время прогнозированию. При этом в начальные периоды таких выделений нельзя исключить значительные содержания водорода в их составе.

Для трубки «Удачная» водообильность, газонасыщенность кимберлитов и вмещающих пород разными типами газов до глубины -1080 абс. м существенно различается как по вертикали, так и по латерали и зависит от литолого-генетических, структурно-тектонических особенностей месторождения, достигая значительных величин. К примеру, ранее во время разведочных работ при вскрытии скважиной 42 на трубке «Удачная-Восточная» газовой ловушки на глубине 368 м зафиксировано наиболее интенсивное газопроявление. Суточный дебит спонтанного газа достигал около 100 тыс. м³/сут. с давлением 5–7 МПа. Газовая смесь состояла из водорода (53,6%), метана (36,9%) и других газовых компонентов. Газ горел в течение 5 сут., и потушить его удалось только сильной взрывной волной. Ранее по восточному рудному телу выбросы свободного газа и рассолов из «ловушек» фиксировались на глубинах от +100 до -750 абс. м.

Прогнозирование газонасыщенных зон при строительстве и эксплуатации подземного рудника «Удачный» является важной и необходимой задачей с позиции обеспечения безопасности ведения горных работ. Оценка газонасыщенности разрабатываемых породных и рудных массивов на месторождении должна

осуществляться в несколько этапов с использованием комплекса всех исходных данных для долгосрочного (регионального) и краткосрочного (локального) прогноза. Продолжительность долгосрочного прогноза оценивается периодом от года до 5 лет, а краткосрочного – от суток до первых месяцев.

Таким образом, первым критерием для долгосрочного прогноза наличия и вскрытия газонасыщенных зон и ловушек в рудных телах и вмещающих отложениях, а также экранов, под которыми происходит аккумуляция свободного газа, является литолого-генетический критерий. Но при этом требуется установление и подтверждение на практике корреляционных связей этих показателей. Приведем один достаточно яркий пример, который был использован при строительстве рудника «Удачный». Для юго-восточного фланга месторождения, приуроченного к промплощадке рудника на участке строительства вертикальных стволов, отслежены и выделены потенциальные нефтегазоопасные интервалы разреза, связанные с наличием рифогенных отложений, в которых отмечены максимальные концентрации сорбированных газов. К ним относятся кровельная (глубина 600–660 м, с абс. отм. -250...-310 м) и подошвенная (глубина 860–910 м, с абс. отм. -510...-560 м) части известково-доломитовой толщи среднего кембрия.

Породы верхнего (600–660 м) интервала представлены отложениями известняково-доломитовой толщи среднего кембрия (Є₂id), состоящими из неравномерно окремненных пористо-кавернозных известняков с прослоями доломитов. Размер каверн – от 1–3 мм до 5 см. Нефтегазонасыщенность пород вскрываемой толщи неравномерная вплоть до сплошной обильной ее пропитки нефтью. Естественная газонасыщенность отложений достигает 2,0 м³/м³. Породы слабо- и среднетрещиноватые (II–III класса трещиноватости по СНиП II-94-80), где расстояния между видимыми трещинами составляет 0,5–1,5 м. Диапазон изменения

крепости грунтов f составляет 5–8 (по шкале проф. М.М. Протоdjяконова) с отнесением к средним и крепким породам. Породы главным образом прочные (ГОСТ 25100-95), средней устойчивости (II), плотные ($p > 2,5 \text{ г/см}^3$).

Отложения нижнего (860–910 м) интервала представлены в основном известняками крупнозернистыми, массивными, фрагментарно окремненными. Поры и каверны от мелких (размером 0,1–0,3 см) до крупных (5×8 см) заполнены частично кальцитовыми щетками с нефтепродуктами (битумом и капельножидкой нефтью) и газом. Нефтегазонасыщенность пород толщи крайне неравномерная, в основном по порам, кавернам и трещинам. Диапазон изменения крепости пород f составляет 6–8 (по шкале проф. М.М. Протоdjяконова) с отнесением к средним по крепости породам. Породы главным образом прочные (ГОСТ 25100-95), средней устойчивости (II), плотные ($p > 2,5 \text{ г/см}^3$). Породы трещиноватые (III класс трещиноватости по СНиП II-94-80), где расстояния между видимыми трещинами составляет 0,5–2,0 м, коэффициент трещиноватости – 3–5.

Вторым критерием для долгосрочного прогноза газопроявлений на месторождении является структурно-геологический. Оценивая структурно-тектоническую обстановку на нижних горизонтах месторождения (см. рис. 2), необходимо выделять опасные разломные зоны, по которым возможна миграция газонасыщенных рассолов из сопряженных областей с обязательным подтверждением степени их потенциальной водо- и газоопасности. Результатом комплексного анализа всех геологических материалов по руднику должно быть составление соответствующими службами прогнозных карт и разрезов с газоопасными зонами с учетом блочной модели месторождения, которые должны регулярно уточняться и пополняться.

Как отмечено ранее, основной подток газонасыщенных флюидов в горные выработки для месторождения связан с кимберлитоконтролирующими разло-

мами северо-восточного простирания. Большая часть газовых выделений и выбросов в горных выработках приурочена к данным зонам наиболее древних тектонических структур. Для перехвата мигрирующих газонасыщенных флюидов рекомендуется производить возмущение всей газогидродинамической системы с выделения газовой фазы как наиболее подвижной составляющей. Поэтому опережающая откачка рассолов из скважин за пределами горных выработок с северо-восточного и юго-западного флангов приведет к предварительной дегазации массива и перехвату подтока газонасыщенных флюидов из смежных областей в пределах депрессионной воронки. Предлагаемая схема снижения мигрирующих газовых потоков с предварительной дегазацией прилегающих блоков пород вблизи трубки «Удачная» является вполне приемлемым решением.

В состав краткосрочного (текущего) прогноза на месторождении должен входить комплекс всех данных, полученных при изучении газообильности вскрываемого горного массива на стадии строительства и эксплуатации рудника в основном за счет бурения опережающих, разведочных и других скважин. При проходке скважин должен быть обязательно организован постоянный контроль динамики газовыделений с оценкой параметров давления флюида в ее устьевой части. В тоже время существует необходимость применения и геофизических методов, включая георадарное просвечивание вскрываемых интервалов разреза, которые будут способствовать выделению опасных зон с оперативным анализом полученных результатов.

В виду отсутствия на нижних горизонтах месторождения развитой системы геологоразведочных скважин возникает необходимость использования для текущего прогноза косвенной информации, получаемой из других оперативных источников. В частности необходимо использовать данные автоматизированного газового контроля при проходке подготовительных и горно-

капитальных выработок. Такая дополнительная информация позволит установить численные зависимости между газовыми, структурно-минералогическими и гидрогеологическими характеристиками пород на различных участках с введением формализованного показателя по газообильности (газовыделению), который будет фиксировать случаи обнаружения газов в рудничной атмосфере, рассредоточенные во времени и пространстве.

Все поступающие данные должны анализироваться и обобщаться с использованием статистических методов, выявлением корреляционных связей и определением числовых показателей. В дальнейшем вся получаемая информация должна служить основой построения прогнозных планов и разрезов газоносности рудных тел, вмещающих массивов с прослеживанием достоверности используемых методов. На основании осуществляемого краткосрочного прогноза для каждого участка должны разрабатываться конкретные мероприятия по дегазации вскрываемых массивов в соответствии со «Специальными мероприятиями...» [10].

При подготовке блоков подземного рудника к отработке и документации скважин представляется необходимым производить качественную экспертную оценку инженерно-геологических свойств этих блоков и литологических подразделений разреза для более корректного прогноза газового режима при проектировании и проходке инженерных сооружений. Для учета разных возможных ситуаций рекомендуется использовать несколько блоков показателей с различающимися параметрами. Наиболее простая методика такой оценки инженерно-геологический свойств скального массива предложена Окамото и Аки [5] и широко используется при проектировании и проходке различных сооружений в Японии и других странах. Пример такой оценки приведен в таблице (первый и второй блоки). Литологический фактор (третий

блок) также играет существенную роль в оценке возможного газового режима участка. Особенное внимание следует обращать на контакты разнородных пород, их кавернозность и трещиноватость. Важное значение для экспертной оценки при прогнозе газового режима по руднику имеет и обводненность пород (четвертый блок).

На основе анализа всех имеющихся комплексных материалов по вскрываемым участкам, которые могут создать в дальнейшем газоопасную обстановку в горных выработках, необходимо проводить их систематизацию (ранжирование) и представлять применяемые критерии с их количественной оценкой. Характерные элементы используемой системы обобщенных показателей с их количественным представлением разделяются по значимости. Набор применяемых критериев определяет газоопасность того или иного участка и позволяет осуществлять районирование по каждому признаку с последующим картографическим отображением. Этот подход к районированию с разделением по значимости и последующим установлением границ опасных участков для каждого критерия и по обобщенному показателю существенно увеличивает эффективность предлагаемой методики прогноза газовыделений на руднике. Пример районирования и апробации предложенной методики прогноза выполнен для Удачинского ГОКа при оценке перспективности участков для удаления рассолов в мерзлые толщи криолитозоны [4].

Рассмотрим детали выполненной количественной оценки существующих критериев. В предложенном варианте разделения комплексной прогнозной системы каждому установленному признаку присваивается ранг. Проведенными ранее исследованиями установлено, что выделенные признаки неодинаково характеризуют эффективность (значимость) существующего критерия. Поэтому для более детального разделения им присваиваются индексы в виде чисел (1, 2, ..., n) с установлением обобщенного

**Экспертная оценка при прогнозе газовой опасности
отрабатываемого участка (зоны)**

1. Классификация скального основания		
Фактор	Категория	Уточнения, характеристики
Твердость пластинки породы	A	Твердая (при ударе молотком дает искры)
	B	Отчасти твердая, отчасти с пониженной твердостью, в целом с несколько пониженной твердостью (раскалывается при сильном ударе молотком)
	C	C низкой твердостью (полностью разрушается при ударе молотком)
Расстояние между трещинами	I II III	Более 50 см От 50 до 15 см Менее 15 см
Состояние трещин	a b c	Плотно сжатые Открытые C глинистым или другим заполнением
Зоны повышенной трещиноватости и зоны разломов	d	Менее 5–10 см, развороты блоков, милониты и катаклазиты, окварцевание, пиритизация
2. Оценка скального основания		
Оцениваемый литологический интервал	Оценка	Комбинации категорий
A	Хорошо	A1a, A1b, B1a, B1b
B	Посредственно	A1c, A1a, A1b, B1c, B1a, B1b, C1a
C	Довольно плохо	A1c, C1b, C1c, C1a, C1b
D	Плохо	Прочие комбинации
3. Литологический фактор оценки газового режима		
Фактор	Категория	Уточнение, характеристика
Присутствие контакта между породами одинакового состава	1	Контакты внутри однородных литологических разновидностей пород
Присутствие контакта между породами разного состава, рифовые постройки	2	Контакты между литологически различающимися породами
Присутствие контакта между массивными и трещиноватыми породами	3	Контакт между известняками, доломитами и мергелями
Присутствие контакта между массивными и кавернозными породами	4	Контакты между однородными или разнородными породами
4. Гидрогеологический фактор оценки газового режима тектонических нарушений		
Фактор	Категория	Уточнение, характеристика
Сухие контакты пород и плоскостей трещин	1(I)	Полное отсутствие свободной воды в породе
Слабо обводненные контакты пород и плоскости трещин	2(II)	Присутствие воды на контактах пород и в плоскостях трещин. Общий дебит – до 10 м ³ /ч
Средне обводненные зоны контактов пород и плоскости трещин	3(III)	Общий дебит – 10–50 м ³ /ч
Сильно обводненные зоны контактов пород и плоскости трещин	4(IV)	Общий дебит – более 50 м ³ /ч
5. Общая экспертная оценка при прогнозе потенциальной газовой опасности участка (зоны)		
Фактор	Категория	Уточнение, характеристика
Потенциально безопасный	I(I)	A1a, A1b, B1a, B1b, 1, 1(I)
Потенциально слабо опасный	II(II)	A1c, A1a, A1b, B1c, B1a, B1b, C1a, 2, 2(II)
Потенциально опасный	III(III)	A1c, C1b, C1c, C1a, C1b, 3, 3(III)
Потенциально очень опасный	IV(IV)	A1c, C1b, C1c, C1a, C1b, d, D, 4, 4(IV)

индекса P_n . Известно, что отмеченные и рассматриваемые признаки в разной степени отображают эффективность критерия, поэтому для соответствия проводимого ранжирования участков введен характеризующий балл (коэффициент) i_n по прерогативе и весомости используемого признака (от 1 до 10). Далее рассчитывается обобщенный показатель K_p нефтегазоопасности природного объекта (зоны, интервала), который выражен суммой всех признаков P_n , усиленных соответствующим коэффициентом:

$$K_p = \sum P_n \times i_n.$$

По результатам оценки рассматриваемого участка (зоны) получаем, что, чем выше обобщенный показатель, тем возможно опаснее природный объект (геологическая структура) и сложнее для решения проблемы по его разгазированию и вскрытию. Это подтверждено анализом натуральных данных при прогнозе нефтегазоопасных интервалов (участков) на руднике «Удачный».

Систематизация имеющихся к настоящему времени материалов по газоносности месторождения трубки «Удачная» и газопроявлениям при освоении глубоких горизонтов позволяет сделать следующие выводы. Подземный рудник «Удачный» обоснованно отнесен к опасным по выделениям взрывчатых газов и возгораниям нефти. Для обеспечения газобезопасности при его строительстве и эксплуатации разработаны и должны выполняться специальные мероприятия газового режима при ведении горных работ [10]. Общая газонасыщенность вмещающих пород, руд и природных рассолов месторождения по сравнению с угольными шахтами является относительно невысокой. Это потребует при организации проходки выработок применения стандартного оборудования для подачи воздуха и обычных методов контроля состава атмосферы рудника с дополнением средствами оценки взрывоопасности многокомпонентных газовых смесей.

Влияние газовых факторов на подземную отработку месторождения с

сопутствующими газодинамическими явлениями зависит в первую очередь от интенсивности проветривания тупиковых забоев, степени их обводненности, литолого-стратиграфической и структурно-тектонической обстановки на участках строительства и эксплуатации, наличия нефтегазонасыщенных отложений и флюидоупорных экранов, а также основных типов нахождения газовой составляющей в разрабатываемых породных и рудных массивах. Одной из особенностей при освоении месторождения трубки «Удачная» является значительная встречаемость сосредоточенных газовыделений в разломных зонах, иногда с повышенным содержанием водорода в начальный период их вскрытия. Предложенная качественная и количественная оценка показателей нефтегазоопасности участков (зон) позволит осуществлять детальное районирование месторождения и выделить наиболее значимые объекты при прогнозе сложности ведения горнопроходческих и добычных работ на подземном руднике.

Библиографический список

1. Дроздов А.В., Иост Н.А., Лобанов В.В. Криогидрогеология алмазных месторождений Западной Якутии. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2008. 507 с.
2. Дроздов А.В., Мельников А.И. Мероприятия по борьбе с газодинамическими явлениями при строительстве подземного рудника «Удачный» // Вестник ИРГТУ. 2014. № 6 (89). С. 87–95.
3. Дроздов А.В., Мельников А.И. Особенности строения многофазных кимберлитовых трубок (на примере трубки Удачной) // Маркшейдерия и недропользование. 2009. № 1. С. 31–38.
4. Дроздов А.В., Мельников А.И. Районирование территорий при выявлении криогенных структур, перспективных для закачки дренажных рассолов (на примере Якутии) // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 2. С. 45 – 51.
5. Геологические структуры / под ред. Т. Уемуры, Ш. Мицунати. М.: Недра, 1990. 292 с.

6. Геология, гидрогеология и геохимия нефти и газа южного склона Анабарской антиклизы / Е.И. Бодунов, В.Л. Белецкий, Г.С. Фрадкин [и др.]. Якутск: Изд-во ЯФ СО АН СССР, 1986. 176 с.

7. Геохимическая характеристика газов и нефтей Ботуобинского района Якутии / Е.И. Бодунов, А.Н. Изосимова, И.Н. Зуева [и др.] // Геология нефти и газа. 1981. № 8. С. 20–28.

8. Изотопный состав углерода битумных и газовых проявлений в кимберлитовых телах / А.И. Кравцов, В.А. Иванов, В.А. Бобров [и др.] // VII Всесоюз. симпозиум по стабильным изотопам в геохимии: сб. тр. М., 1978. С. 252–254.

9. Особенности гидрогеологического строения и гидрохимической зональности кимберлитовой трубки «Удачная» / А.В. Дроздов, К.Н. Егоров, С.П. Готовцев, И.В. Климовский // Комплексные мерзлотно-гидрогеологические исследования. Якутск: ИМ СО АН СССР, 1989. С. 145–155.

10. Специальные мероприятия газового режима при ведении горных работ на подземном руднике «Удачный» в условиях газонефтепроявлений (выпуск 3) / А.В. Дроздов, А.В. Боланёв, М.К. Сороченко [и др.]. Мирный: Мирнинская городская типография, 2013. 172 с.

Статья поступила 30.11.2015 г.